

混成堤マウンド被覆石の安定性に関する 実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON STABILITY OF ARMOR STONES OF COMPOSITE MOUND

杉野輝彦¹・古田喜代志¹・金田研一郎²・吉田要²

Teruhiko SUGINO, Kiyoshi FURUTA, Kenichiro KANETA, Kaname YOSHIDA

¹運輸省第五港湾建設局伊勢湾水理模型実験場 (〒457-0833 名古屋市南区東又兵衛町一丁目57番地の2)

²玉野総合コンサルタント(株) 海洋部 (〒461-0005 名古屋市東区東桜二丁目17番43号)

The relaxation of the construction criterion for leveling of armor stones in mound is expected to reduce the construction cost of a composite breakwater in Ise Bay. The stability of armor stones in the "non-leveling" and "heaping up" construction methods is studied in a hydraulic experiment. The result for these cases is compared with that for the general leveling. Additionally, the diagram giving the critical depth for an allowable damage rate of approximately 1% in the non-leveling method is proposed.

Key Words : Leveling of armor stones, relaxation of construction criterion, composite breakwater, critical depth of stability, hydraulic experiment

1. はじめに

最近の社会経済情勢をみると、景気低迷による税収不足を背景に、国、地方の財政は深刻な状況にあり、港湾整備事業においても、各種のコスト縮減が緊急の課題となっている。

こうした課題の一環として、本研究は、伊勢湾内の任意の海域における「混成堤」を対象に水理模型実験を行い、工事費の大きなウエイトを占める「マウンド被覆石均し工」に関し、「均しを行わない条件（以降、「均し工無し」と呼ぶ）」や「均し工無しで被覆層を多層にする条件（以降、「多層積み」と呼ぶ）」での安定特性を、「均し工有り」の条件と比較しながら検討し、施工基準の緩和を可能とする条件を明らかにするものである。

2. 実験内容

(1) 実験装置

実験は、運輸省第五港湾建設局伊勢湾水理模型実験場内の二次元水路で行った。実験水路は、図-1に示すように、長さ30m、幅1m、深さ1.2mからなり、水路の一端に設置されている吸収制御方式のピストン型造波装置で、単一方向不規則波を造波することができるものを用いた。

(2) 実験条件

図-2は、実験対象とした混成堤の標準断面を示したものであり、マウンドの条件は、天端水深4m、肩幅9m、法面勾配1:2とし、上部工天端高は入射有義波高の0.6倍とした。

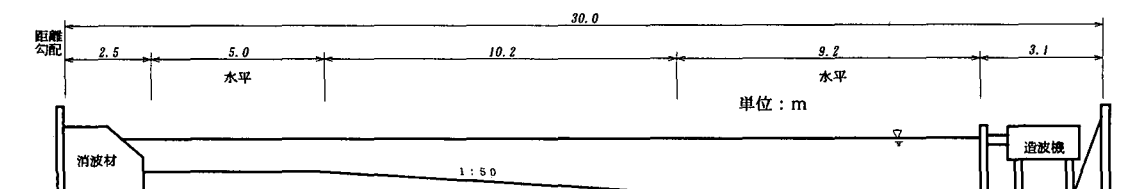


図-1 実験水路

実験対象波は、伊勢湾内の設計波を参考に $H_{1/3}=2.3\text{m}, 3.0\text{m}, 4.0\text{m}$ の3種類、 $T_{1/3}=5\text{s}, 6\text{s}, 7\text{s}, 9\text{s}$ の4種類の組み合わせのうち、沖波波形勾配0.06以下となる計9種類を対象とした。周波数スペクトルは、いずれも、修正プレットシュナイダー・光易型を目標とした。

実験に使用した被覆石重量は、0.6t, 1.0t, 2.0t の3種類であり（「均し工有り」及び「多層積み」は1.0t石のみで実施）、各々、法肩を除くマウンド法面の全範囲に各種条件（均し工有り、無しは2層、多層積みは4層）で配置した。マウンド天端及び法肩部には、各種被覆石の2層厚と、ほぼ等しい高さの被覆ブロックを配置した（表-1参照）。

(3) 実験及び解析方法

a) 実験模型

図-3は、実験に使用した模型平面及び断面を示したものである。安定実験の対象範囲は、水路幅1mの中央50cm幅分のマウンド法面とし、検査域の被覆石は5つの水深帯（水深1.5mピッチ）に区分し、色分けをした。以降、この水深帯を安定限界水深把握のための基準とした。なお、「多層積み」における多層石については、マウンド中央付近を境に、本体層と異なる色で2分した。

b) 被覆石の設置方法

「均し工無し」の条件における被覆石の設置は、現地施工方法に準じ、1層毎に、マウンド上5cm程度の位置から、0.6tの場合は3~4個、1.0, 2.0tの場合は1~2個を同時に捨て込み、2層分設置した。設置後は、顕著に不安定なもの以外、石の修正は行わなかった。

「多層積み」の場合も、「均し工無し」と同様な方法で本体層分2層、多層分2層、計4層を設置した。なお、「均し工有り」の条件では、被覆石間の隙間を開けないように1つずつ設置した。

c) 実験方法

実験の繰り返し回数は3回とした。ここで、同一周期の条件では低波高から高波高にかけて連続して実験を行い、各々、被害個数の累計として評価した。

なお、「多層積み」の条件との混在を回避するため、各波高終了時に、被害を受けた被覆石を回収した。

d) 解析方法

被覆石の被害個数は、色分けした5つの水深帯毎に測定し、検査域内の総設置個数で除して、水深帯別の被害率として算出した。

そして、「均し工無し」や「多層積み」の条件における各種入射波諸元や被覆石重量に対する安定特性を、「均し工有り」の実験結果との比較を交えながら検討した。

さらに、実験結果をもとにして、許容被害率（1%と設定）を指標に、相対肩幅（ B_M/L' ； L' は水深 h' における波長）をパラメータとする各種条件での安定限界水深推定図を作成した。

なお、各水深毎の被害率には、繰り返し回数3回

の平均値を使用することを原則としたが、被覆石の被害は、変動性の高い現象であることから、許容被害率付近の結果については、変動性を勘案しつつ、危険側の値を代表値とすることとした。

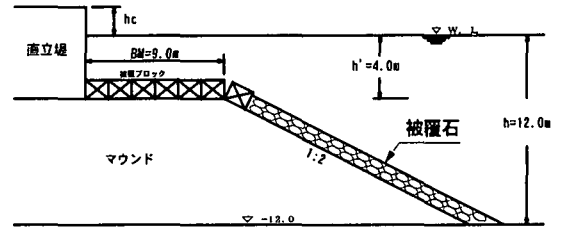


図-2 実験対象断面

表-1 実験条件

項目	条件
模型縮尺	1/30
水深 h マウンド水深 h' マウンド肩幅 B_M	12.0m 4.0m 9.0m
石の重量 W	0.6, 1.0, 2.0t の3種類
有義波周期 $T_{1/3}$ 有義波高 $H_{1/3}$	5, 6, 7, 9s の4種類 (重量2t時は、6, 7, 9s) 2.3, 3.0, 4.0m の3種類 (重量2t時は、3.0, 4.0m)
沖波波形勾配	0.02~0.06
直立部の天端高 h_c	$0.6 H_{1/3}$

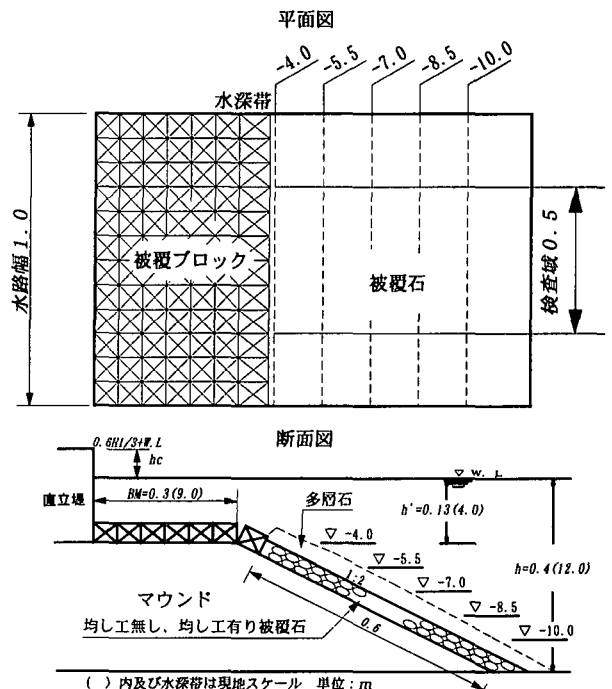


図-3 実験対象模型平面及び断面

3. 均し工無しの条件における安定特性

(1) 波高・周期と被害率の関係

図-4(a)~(c)は、被覆石重量別に、各波高・周期とマウンド法面水深帯毎の被害率の関係を示したものである。

はじめに、全体傾向をみると、被害率は、波高が高く、水深が浅いほど高くなっている。これは、被覆石の被害が重複波によってもたらされる「流速」に支配され、流速は、波高に比例、水深に逆比例の関係で大きくなるためである。

また、被害率は周期にも比例して高くなっているが、これは、本マウンド条件（法肩幅9m）の場合、 $T_{1/3}=9$ s時に、重複波の「節」の位置が、マウンド法面の比較的水深の浅い範囲に最も近づくためと推測される。

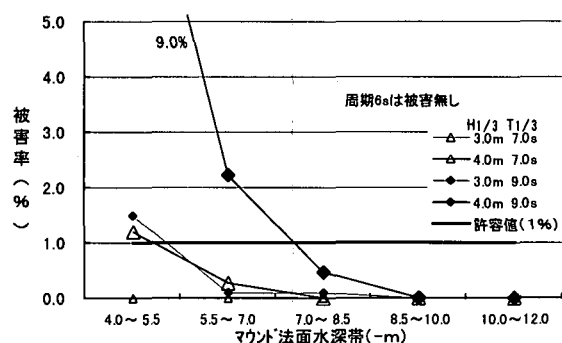
被覆石重量別に傾向をみると、2.0t石の場合、 $T_{1/3}=7$ sの被害は、 $H_{1/3}=4.0$ mでのみ発生し、被害率が許容値（1%）以上となった水深帯も最も浅い-5.5m以浅層に限られており、マウンド法面の大部分は、均しが無くても安定的となっている。 $T_{1/3}=9$ sになると、被害はすべての波高で発生し、 $H_{1/3}=4.0$ m時は-7.0m層以浅で、 $H_{1/3}=3.0$ m時でも水深の浅い-5.5m層以浅で許容値を超えているが、その他の水深帯は許容値以下となっており、マウンド法面の半分程度は、均しが無くても安定的となっている。

1.0t石についてみると、 $T_{1/3}=5$ sの条件では、被害はみられず、 $T_{1/3}=6$ sの場合も、被害率はすべての波高で許容値未満となっており、マウンド法面全体にわたり、均しが無くても安定的となっている。 $T_{1/3}=7$ sでも、2.0t石と同様、 $H_{1/3}=4.0$ m時に、最も水深の浅い-5.5m以浅の層で許容値を超えるのみであり、マウンド法面の多くの部分は均しが無くても安定的といえる。 $T_{1/3}=9$ sになると、被害の程度や範囲は増加し、 $H_{1/3}=4.0$ m時は-7.0m層以浅で被害率10%以上、 $H_{1/3}=2.3\sim 3.0$ mでも最も水深の浅い-5.5m以浅の層で被害率3%以上といずれも許容値を大きく超えているが、その他の水深帯は許容値未満となっており、マウンド法面の半分程度は、均し無しでも安定的と推測できる。

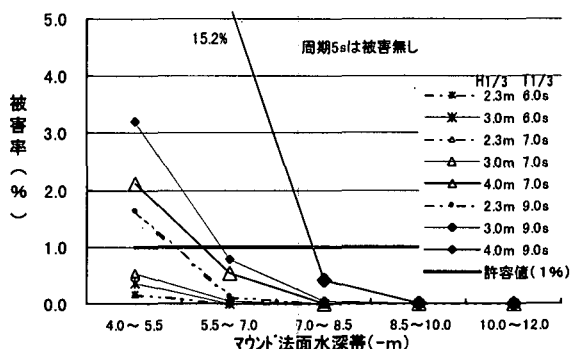
0.6t石についてみると $T_{1/3}=5\sim 6$ sの場合、1.0t石同様、被害率が許容値を超える水深帯はなく、マウンド法面全体にわたり、均しが無くても安定的である。 $T_{1/3}=7$ sになると、1.0t石よりも被害が増加し、 $H_{1/3}=4.0$ mでは-7.0m層以浅で、 $H_{1/3}=3.0$ mでも最も水深の浅い-4.0~-5.5m層で許容値を超えているが、その他の水深帯は許容値未満となっており、マウンドの均し無しでもマウンド法面の50%程度は、安定的と推測できる。 $T_{1/3}=9$ sになると、他の石同様、被害は急増し、 $H_{1/3}=4.0$ m時は-8.5m以浅の層で、 $H_{1/3}=3.0$ mでは-

7.0m以浅の層で、 $H_{1/3}=2.3$ mでも水深の浅い-5.5m以浅の層でいずれも許容値を超える結果となっている。特に、 $H_{1/3}=4.0$ mの場合、最も水深の浅い-4.0~-5.5m層では、マウンド基礎石が吸い出されて天端部が陥没するほど凄まじい被害状況となり、 $T_{1/3}=9$ s、 $H_{1/3}=4.0$ mでは、均し無しでも安定的となる範囲はかなり限られるものと推測される。

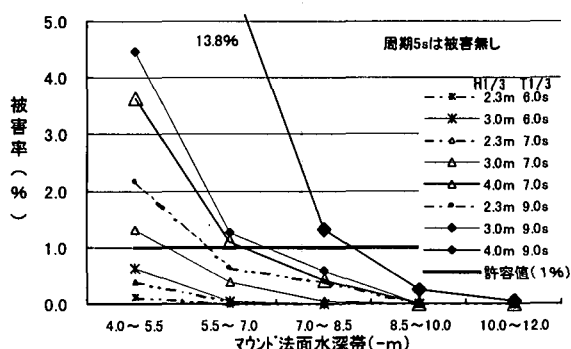
なお、目視観察の結果、いずれの被覆石においても、動揺していた石が、波の繰り返し作用によって、徐々に安定化する例を多々確認している。これは、初期状態時に「石同士の隙間」が存在することによって、自然の力による「かみ合わせ向上」が図られたためであり、「均し工無し」の大きな特性となることが解った。



(a) 被覆石重量 2.0 t



(b) 被覆石重量 1.0 t



(c) 被覆石重量 0.6 t

図-4 波高・周期と被害率の関係

(2) 被覆石重量の違いによる特性

図-5は、 $H_{1/3}=3.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=9\text{s}$ 時における被覆石重量と被害率の関係を示したものである。

これをみると、重量の増加に伴って被害率は一気に減少していることが解る。この傾向を、最も水深の浅い-5.5m以浅の層について詳細にみると、重量が1.0tから2倍の2.0tに増加することで、被害率はその逆数に当たる約50% (1/2) に減少している。こうした傾向は $T_{1/3}=7\text{s}$ においても現れており、被害率は、ほぼ重量増加率の逆数で減少していることが解った。

図-6は、被覆石重量1.0t、 $T_{1/3}=9\text{s}$ 、 $H_{1/3}=2.3\sim 4.0\text{m}$ の実験結果をもとに、相対重量と被害率の関係を示したものである。ここに、相対重量とは、実験で使用した被覆石重量 W と、実験条件（波高、周期、マウンド水深、マウンド法肩幅等）から算定される法肩での所要重量 WD の比である。

これをみると、相対重量0.14では水深-7.0m以浅、相対重量0.37では-5.5m以浅の層で、被害率が許容値を超える結果となっているが、それ以深では概ね安定的であり、相対重量0.96（すなわち、法肩所要重量に近似）になると、マウンドの大部分が、ほぼ安定的となっている。このように、均しが無くかつ、重量が所要の20%弱であっても、マウンドの比較的深い範囲（-7.0m以深）は安定的となる可能性があることが解った。

(3) 均し工有りの条件との比較

ここでは、1.0t石を対象に、一般的な「均し工有り」の条件における実験結果と比較しながら、「均し工無し」の特性を検討する。

図-7(a)、(b)は、 $T_{1/3}=9\text{s}$ 、 $H_{1/3}=3.0\text{m}$ 、4.0mにおける「均し工無し」、「均し工有り」の被害率を比較したものである。これをみると、-7.0m以浅の層における被害率は、いずれの波高も「均し工無し」の条件で高くなっており、「均しの有無」による違いが現れている。ただ、 $H_{1/3}=3.0\text{m}$ 時には両者の差が2倍以上あったものが、 $H_{1/3}=4.0\text{m}$ 時には1.2倍程度に減少しており、「均しの有無」による有意な差は無くなるようである。

この要因は、石に作用する流速が高まって、「均しによるかみ合わせの強さ」が相対的に低下するためであり、さらに波高が高まれば、「均しの有無」による被害率の差は無くなるものと推測される。さらに、許容被害率（1%）を指標とした場合、両波高とも、「均し工無し」で許容値を超えている水深帯を「均し」によって許容値未満に抑えることはできず、結果、当該水深帯については、「均し工有り」でも対応できないものと推測される。

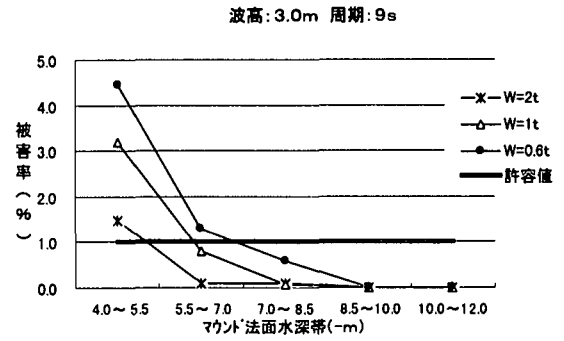


図-5 被覆石重量と被害率の関係

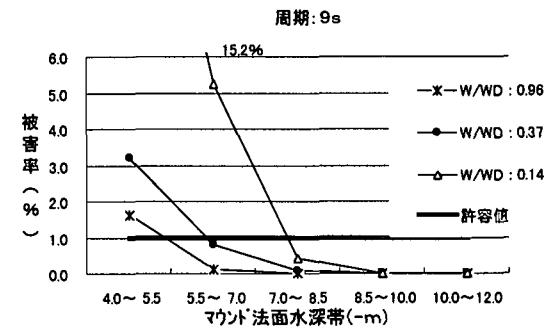
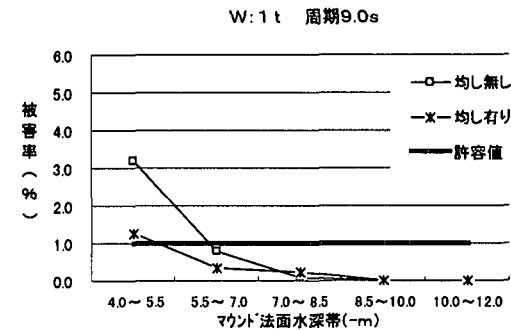
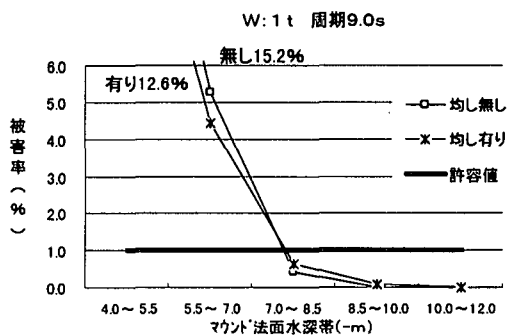


図-6 相対重量 (W/WD) と被害率の関係



(a) 波高 3.0m



(b) 波高 4.0m

図-7 「均し工有り」「均し工無し」の被害率の比較

4. 多層積みの条件における被覆石の安定特性

ここでは、1.0 t 石を対象に、被覆石を「多層積み」とした場合の特性を検討する。

図- 8(a), (b)は、 $T_{1/3}=9\text{ s}$ 、 $H_{1/3}=3.0\text{ m}$ 、 4.0 m における「多層積み」の条件と「均し工無し」及び「均し工有り」の条件での被害率を比較したものである。

なお、「多層積み」の被害率は、多層石（2層分）に覆われた本体層の被覆石を対象としている。

これをみると、被覆石を「多層積み」にすることにより、いずれの波高も、ほとんどの水深帯で本体層の被害はみられなくなり、「均し工有り」や「均し工無し」の条件で許容値を大きく超えていた $H_{1/3}=4.0\text{ m}$ 時における -5.5 m 以浅の層においても、被害率は1 %未満に収まる結果となった。

「多層積み」により、本体層の被害が激減する要因は、波作用中及び作用後の石の配置状況に対する目視観察の結果、以下のとおりと推測される。

- ①一次効果として、多層石により、波による外力（抗力・揚力）から保護されること
- ②二次効果として、多層石で保護されている間に、本体被覆石も動揺を繰り返しながら、前述のとおり、石同士のかみ合わせが向上すること。なお、多層石自体のかみ合わせも同時に向上しているものと思われる。

③三次効果として、本体層が動揺している間に、多層石自体が当該層にはまり込み、自然の力による「強固なかみ合わせ」が実現すること

以上のことより、「多層積み」は、「均し工無し」はもとより、「均し工有り」に比べても、被覆石の安定性に関し優位となることが確認された。ただ、「多層積み（2層分）」の場合、材料コスト面から、「均し工有り」の施工コストとそれほど変わらないものと予想され、今後、「1層の多層積み」等について検討する必要があるものと考えられる。

5. 均し工無しの条件における安定限界水深推定図の提案

図- 9は、「均し工無し」の実験結果を基に作成した、周期をパラメータとする波高と安定限界水深 hD の関係（事例：1.0 t 石）を示したものである。ここに、「安定限界水深」とは、「均し工無し」の条件でも安定性が確保できるマウンド法面上の上限水深であり、具体的には、被害率が許容値（1 %）未満となる水深帯の上限値を対象とした。ただし、被害率が許容値未満であっても、目視観察等の結果によっては適宜、許容値を超える結果として処理した。

これをみると、 $H_{1/3}=2.3\text{ m}\sim 4.0\text{ m}$ における安定限界水深は、 $T_{1/3}=7\text{ s}$ の場合、 $-4.0\text{ m}\sim -5.5\text{ m}$ 、 $T_{1/3}=9\text{ s}$ の場合、 $-5.5\text{ m}\sim -8.5\text{ m}$ となり、各々、それ以深では、「均し工無し」でも、所要の安定性を

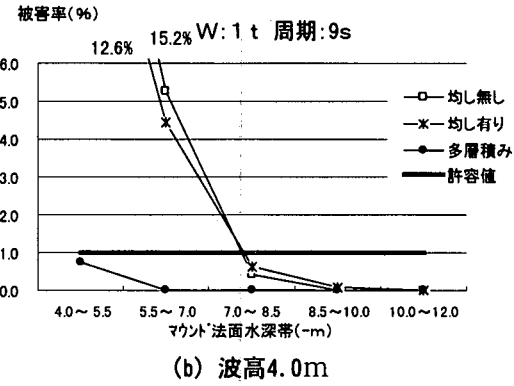
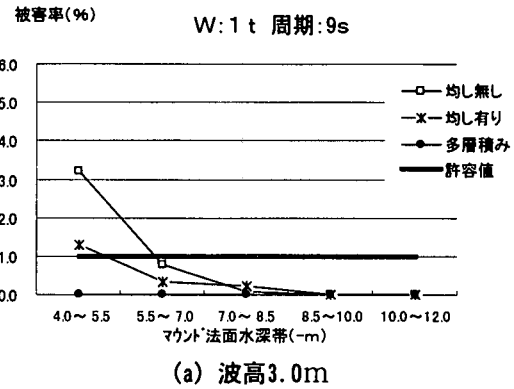


図- 8 「多層積み」「均し工無し」の被害率の比較

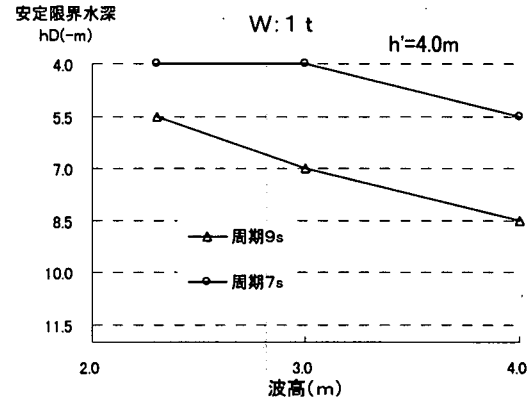


図- 9 均し工無しの条件における安定限界水深 hD

確保することができるものと推測される。

また、図- 10は、図- 9と同様な方法で作成した $T_{1/3}=9\text{ s}$ 、1.0 t 石の条件における「均し工有り」、「多層積み」の安定限界水深 hD を示したものである。

これによれば、「均し工有り」の安定限界水深 hD は、「均し工無し」のそれより水深帯1層分（1.5 m）、同じく「多層積み」では2層分（3.0 m）程度浅くなることが推測できる。

図- 11は、「均し工無し」の条件において、すべての被覆石重量を対象に、安定限界水深 hD を求め、相対マウンド肩幅（ B_M/L' ）をパラメータとしてプロットした任意の波高における安定限界水深推定

図である。この図より、本実験で対象とした混成堤（マウンド天端水深4m）に関し、任意の波高、周期、マウンド肩幅に対する「均し工無しの条件での安定限界水深 h_D 」を推定することができる。

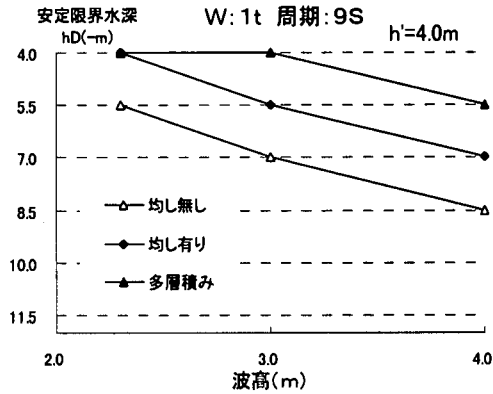
ただし、本推定図の精度に対する検証実験は現時点で実施していないことから、本実験で対象とした条件以外は、あくまでも目安として用いるべきと考える。

6. 主要な結論

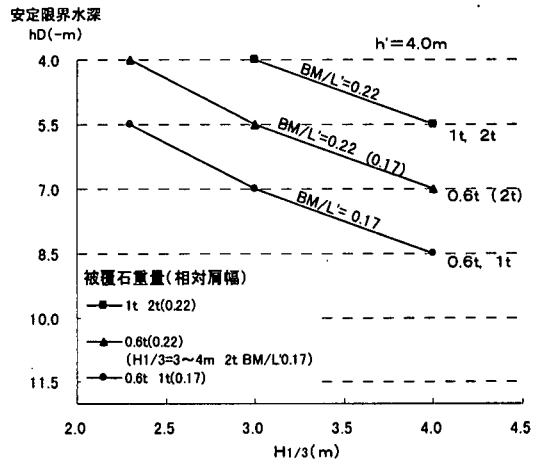
本研究では、伊勢湾内の任意の海域における、「混成堤」について、水理模型実験を行い、マウンド被覆石「均し工無し」「多層積み」の安定特性を検討した。

その主要な結論は、以下に示すとおりである。

- ① 本実験で対象とした条件では、「均し工無し」の条件で被害率が許容値（1％）を超える範囲は、マウンド法面の-4.0m～-8.5mに限られ、各々、それ以深の範囲は「均し工無し」でも安定的となることが解った。
- ② 被害率と被覆石重量の関係をみると、被害率はほぼ重量増加率の逆数で減少することが解った。
- ③ 均しの有無による比較をすると、「均し工無し」は、相対的に被害が高まる傾向にあった。ただ、「均し工有り」においても許容値を超えている水深帯を許容値未満に抑えることはできず、均しの有無によるマウンド安定性の有意な差が現れないことが解った。
- ④ 1.0t石を対象とした「多層積み」の条件では、いずれの波高、周期でも、本体層の被害はほとんどみられなかった。このことより、「多層積み」は、「均し工無し」はもとより、「均し工有り」の条件と比べても、被覆石の安定性に関し、優位となることが解った。
- ⑤ 実験結果を基に、許容値（被害率1％未満）以上となる、安定限界水深を求め、各種の均し条件に対する「安定限界水深推定図」を作成し、さらに「均し工無し」の条件について、相対マウンド肩幅（ B_M/L' ）をパラメータとする任意の波高、周期、マウンド肩幅に対する「安定限界水深推定図」を作成した。



図－ 10 被覆石状態の違いによる安定限界水深 h_D



図－ 11 均し工無しの条件となる任意の波高、任意の相対肩幅における安定限界水深推定図

参考文献

- 1) 谷本勝利, 柳生忠彦, 村永努, 柴田鋼三, 合田良実: 不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第21巻, 第3号, pp.3～42, 1982
- 2) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版, 1991
- 3) 運輸省港湾土木請負工事積算基準, 平成10年度改訂版, 社)日本港湾協会

(1999. 4. 19受付)